

城市道路交通诱导与控制 融合系统理论及方法

◆ 龚 葵 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

城市道路交通诱导与控制 融合系统理论及方法

龚 奕 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

城市交通信号控制系统和城市交通流诱导系统是智能交通系统的核心组成部分和重点研究领域。本书提出的城市道路交通诱导与控制融合系统理论是基于信息物理系统的,是将 UTCS 和 UTFGS 深度融合的新理论。在此理论基础上,提出了 UTCS 和 UTFGS 的融合框架、融合框架下的路网模型、融合框架下的单车诱导算法和系统诱导算法,以及城市交通控制与路径诱导系统融合算法。通过仿真验证,本书提出的城市道路交通诱导与控制融合系统理论及方法可在一定程度上解决了城市交通的拥堵、供需失衡、效率低和能耗排放高的问题。

本书可作为交通运输工程类本科生,以及交通信息工程及控制、交通运输规划与管理、载运工具运用工程专业的硕士生、博士生及培训班参考用书。也可供从事智能交通系统、交通信息工程及控制、交通运输规划与管理等领域工作的科学研究人员和技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

城市道路交通诱导与控制融合系统理论及方法 / 龚葵著. —北京:北京交通大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5121-3800-1

I. ①城… II. ①龚… III. ①城市道路—城市交通系统—智能系统—研究 IV. ①U491.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 286435 号

城市道路交通诱导与控制融合系统理论及方法

CHENGSHI DAOLU JIAOTONG YUDAO YU KONGZHI RONGHE XITONG LILUN JI FANGFA

策划编辑:韩 乐

责任编辑:付丽婷

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编:100044

印 刷 者:艺堂印刷(天津)有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:148 mm×210 mm 印张:6.25 字数:180 千字

版 次:2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3800-1/U·344

定 价:38.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。

投诉电话:010-51686043;传真:010-62225406;E-mail:press@bjtu.edu.cn。

前 言

目前城市交通面临的主要四个热点问题为拥堵、供需失衡、效率低和能耗排放高。这四个热点问题本质上是城市交通被按照层级划分为各个子系统，之后对各子系统分化而治导致的。具体地说，这使得城市交通即便采用智能交通系统，仍无法实现各个子系统的一体化规划、管理及运营，有时甚至不可避免各个子系统在目标和方法上的冲突。传统的方法是通过对各子系统的协同来解决它们之间的冲突问题。

本书从另一个角度，以解决这四个热点问题为研究目标，提出了城市道路交通诱导与控制融合系统理论及方法。该理论及方法以城市交通信号控制系统（UTCS）和城市交通流诱导系统（UTFGS）这两大智能交通系统的核心组成部分为研究对象，运用信息物理系统（CPS）理论将 UTFGS 与 UTCS 融合。融合研究将 UTCS 与 UTFGS 的时空因素同一化，以达到系统优化目标，利于消除交通拥堵；考虑人机因素，以提高诱导接受率，达到诱导目标，实现供需平衡；调整 UTCS 以降低延误，达到控制目标，提高效率；以系统优化目标、诱导目标、控制目标为基础，考虑节能减排目标，以达到总融合目标，利于绿色交通出行。

本书的内容如下。

第 1 章介绍了城市交通控制与路径诱导系统（UTCRGS）时空拥堵、CPS、UTCRGS 协同、交通调查、评价指标、路网模

型、单车诱导算法、交通系统诱导算法、交通控制算法的研究现状及存在问题，以及本书的研究目的、意义、研究内容及基本结构。

第2章为基于CPS理论的UTCGRS融合研究，包括UTCS与UTFGS的冲突性及解决方案，CPS用于UTCGRS的可行性，UTCS和UTFGS的融合框架。

第3章为融合框架的输入、输出及路网模型，包括驾驶员出行需求调查，评价指标，拥堵程度时变的随机路网模型。

第4章为融合框架下的单车诱导算法。为避免多车诱导导致的拥堵，同时满足驾驶员出行需求，本书的单车诱导算法融合系统优化目标和单车诱导目标。针对路网交通状况不确定性问题，单车诱导方式分为全局式和步进式。本章建立了评价指标，分析了算法复杂度和典型路网结构，并对本书的单车诱导算法进行了仿真验证。

第5章为融合框架下的系统诱导算法。针对多车诱导导致的拥堵问题，考虑驾驶员出行需求，提出了一种提高诱导接受率的交通系统诱导算法。本书的系统诱导算法同时达到系统优化目标和诱导目标。本章建立了评价指标，分析了算法收敛性及复杂度，并对本书的系统诱导算法进行了仿真验证。

第6章为UTCGRS融合算法。针对节能减排的总融合目标，研究了同一交通系统时间和空间因素的UTCGRS的融合算法。在本书系统诱导算法的基础上，融合算法增加了以降低延误为目标的UTCS。融合算法同时达到系统优化目标、诱导目标、控制目标和总融合目标。本章建立了评价指标，并对本书的UTCGRS融合算法进行了仿真验证。

本书提出的城市道路交通诱导与控制融合系统理论适用于城市交通领域，为解决城市交通的四个热点问题提供了新的视角和方法，具有一定的理论参考意义。本书提出的城市道路交通诱导与控制融合系统方法，包括各方法的仿真验证，为城市交通系统

的优化提供了参考案例，具有一定的实践指导意义。

本书虽然提出了城市道路交通诱导与控制融合系统理论及方法，在理论和方法上有所创新和突破，但作为新理论及方法，其研究仍有待深入。由于作者水平有限，难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

著者

2018. 12

缩 略 语

缩略语	英文名称	中文名称
CPS	cyber-physical system	信息物理系统
GPS	global positioning system	全球定位系统
UTCGRS	urban traffic control and route guidance system	城市交通控制与路径诱导系统
UTCS	urban traffic control system	城市交通信号控制系统
UTFGS	urban traffic flow guidance system	城市交通流诱导系统
3C	computing, communication and control	计算、通信及控制

目 录

1 引言	1
1.1 研究现状	1
1.1.1 UTCRGS 时空拥堵的研究现状	2
1.1.2 CPS 研究现状	3
1.1.3 UTCRGS 协同的研究现状	5
1.1.4 交通调查、评价指标及路网模型的研究现状	9
1.1.5 单车诱导算法的研究现状	11
1.1.6 交通系统诱导算法的研究现状	12
1.1.7 交通控制算法的研究现状	14
1.2 存在问题	16
1.3 研究目的和意义	20
1.4 本书研究内容及基本结构	24
2 基于 CPS 理论的 UTCRGS 融合研究	26
2.1 UTCS 与 UTFGS 的冲突性及解决方案	27
2.1.1 UTCS 和 UTFGS 的内容和时空性	27
2.1.2 UTCS 和 UTFGS 冲突性	29
2.1.3 UTCS 和 UTFGS 冲突性解决方案	33
2.2 CPS 用于 UTCRGS 的可行性	36
2.2.1 CPS 特性	37

2.2.2	UTCRGS 主要问题及特性	40
2.2.3	UTCRGS 和 CPS 关联性及技术要求	43
2.3	UTCS 和 UTFGS 的融合框架	45
2.4	小结	54
3	融合框架的输入、输出及路网模型	55
3.1	驾驶员出行需求调查	56
3.2	评价指标	61
3.3	拥堵程度时变的随机路网模型	64
3.3.1	路网特性及可变元胞传输模型原理	64
3.3.2	车道元胞模型	67
3.3.3	交叉口元胞模型	69
3.3.4	拥堵程度判断指标	70
3.3.5	仿真验证	71
3.4	小结	80
4	融合框架下的单车诱导算法	82
4.1	单车诱导算法原理与思路	83
4.2	单车诱导算法步骤	85
4.2.1	求解理想路径生成点	85
4.2.2	确定理想路径	87
4.2.3	实际诱导	91
4.3	单车诱导算法诱导方式	96
4.3.1	步进式算法确定备选路径	98
4.3.2	步进式算法确定理想路径	99
4.3.3	步进式算法实际诱导	100
4.4	单车诱导算法目标、评价指标及算法复杂度	103
4.5	典型路网结构分析	108
4.6	仿真验证	112
4.6.1	各单车诱导算法的仿真结果及分析	113
4.6.2	比较各单车诱导算法的仿真结果	127

4.7 小结	129
5 融合框架下的系统诱导算法	132
5.1 系统诱导算法目标及原理	133
5.2 交通网状态模型及路网状态分析	135
5.3 系统诱导算法	138
5.4 算法评价指标、收敛性及复杂度分析	141
5.5 仿真验证	144
5.5.1 多车诱导结果及分析	145
5.5.2 系统诱导结果及分析	146
5.6 小结	148
6 UTCRGS 融合算法	149
6.1 融合算法目标及原理	150
6.2 融合算法及评价指标	153
6.3 融合框架下的控制算法	158
6.4 仿真验证	163
6.4.1 诱导、系统优化和控制目标仿真结果及 分析	164
6.4.2 总融合目标验证结果及分析	166
6.5 小结	167
7 结论	169
参考文献	173

1

引言

当前城市智能交通系统的具体内涵是，对交通系统状况的实时检测，对交通系统车辆路径的实时规划，对交通系统控制策略的实时调整，系统与用户间的良好通信和实现这些所需的系统计算能力。UTCRGS 问题是智能交通系统的核心组成部分^[1]。UTFGS 和 UTCS 的共同作用是智能交通系统成败的关键。协同理论及方法是目前研究 UTCRGS 问题最常用的理论及方法。本书基于 CPS 理论研究 UTCRGS 的融合问题，用于进一步解决 UTCRGS 协同未解决的交通问题。

本章总结了 UTCRGS 的研究现状、存在问题，分析了 UTCRGS 的研究目的和意义，明确了本书研究内容及基本结构。

1.1 研究现状

UTCRGS 面临的首要问题是交通拥堵问题。确定采用什么理论及方法是 UTCRGS 解决交通拥堵问题的先决条件。传统的交通课题研究，需要进行交通调查，并建立路网模型及评价指标。UTCRGS 按照功能划分，分为诱导部分（单车诱导、系统

诱导) 和控制部分。

本章总结了目前的相关研究现状, 主要包括 UTCRGS 时空拥堵的研究现状, CPS 的研究现状, UTCRGS 协同的研究现状, 交通调查、评价指标及路网模型的研究现状, 单车诱导算法的研究现状, 交通系统诱导算法的研究现状, 交通控制算法的研究现状。

1.1.1 UTCRGS 时空拥堵的研究现状

交通系统中, 交通诱导是车辆在空间上的分配^[2], “最优解”是车辆在空间(路网)上均匀分布。交通系统中, 交通控制通过交叉口配时使车辆在时间上进行分配^[2], “最优解”是车辆在时间上均匀分布。城市区域的交通数据时空域建模在最近几年被关注^[2]。由此, 交通流实质是路网内车辆在空间分布和时间分布上的比值, 具有时空性^[3-4]。传统 UTFGS 和 UTCS 需要借助交通流预测^[5-6]是为了体现两者分别在时空一致上的作用。

智能交通技术要求实时交通预测快速和可扩展到完整城市网络^[7], 而智能交通系统应用取决于计算精度的提高和交通流预测时间的节约^[8]。因此, 交通流预测与实际交通流的误差, 成了 UTFGS 与 UTCS 的瓶颈^[9]。不准确的交通流预测可能增大车辆在空间和时间上分布的差距, 导致新“拥堵”。而准确的交通流预测通常需要较大的计算量与较长的计算时间, 提高交通流预测精度可能延误 UTFGS 与 UTCS, 使 UTFGS 与 UTCS 在时间和空间上部分失效。

纵观交通诱导算法与交通控制算法的发展, 早期的交通诱导算法针对空间因素^[10], 而交通控制算法在侧重时间因素基础上考虑了交通流作用^[11]。随着研究的发展, 发现为利于系统优化, 须从根本上增大交通诱导与交通控制的时空一致。在原有的经典算法基础上, 交通诱导改进算法^[12]考虑了时间因素。改进算法

在某些情况下无解，或会导致计算困难、多解等问题。考虑交通系统的动态特性，交通网状态是时变的。国内外学者对偏重时间因素的诱导算法^[13-14]进行了研究，这些诱导算法可对交通控制算法的不足进行补充，以利于时间上的目标优化。目前，部分国内外学者发现以往交通控制算法研究侧重时间因素，不利于消除拥堵^[15-16]。交通控制算法需加强对距离因素的考虑，对交通诱导算法不足进行补充，以利于车辆空间上的目标优化。综上所述，目前交通诱导算法和交通控制算法不能分别独立解决时空拥堵问题。

1.1.2 CPS 研究现状

CPS 是通过计算技术、通信技术、控制技术，将计算、网络 and 自然/人工物理世界融合为一体的复杂系统^[17]。为了更好地说明 CPS 的含义，对 CPS 和物联网进行了比较。两者的不同点是物联网通过各种采集信息方法来感知物理世界中的各实际物质。而 CPS 以物联网为基础，是物联网未来发展的方向之一。CPS 采用与物联网相同的感知各实际物质的方法，为物理世界提供最优控制^[18]及管理决策。

目前，CPS 的研究领域有电力^[19]、交通^[20]、节能减排^[21-23]，智能家居远程控制家电^[21,24]，智能水分配^[25-26]，最小化气体泄漏干扰的气体分布控制^[27]，医疗和药物设备远程控制^[21,28]，环境监测^[29]，工业系统远程监控^[30]。除此之外，还有分布式机器人、军事系统，智能建筑、智能桥梁建设，汽车，移动通信设备，国防（自治车辆的网络化编队），农业等领域^[31]。

具体地说，CPS 在电力系统中的应用能够降低电能消耗，提高系统可靠性，实现远程监控和故障排查^[19]，主要方法是加入大量分布式生产电源、电力存储设备和大量可控充电设备（如充电式电动汽车）。在交通运输领域，CPS 的热点问题包括交通系

统的全局最优管控，路网效率和容量的提高，系统总耗能的节约，交通系统的远程监控，交通系统及车辆的安全问题研究等^[19]。CPS在智能家居领域的应用主要集中在对家电的远程控制，与物联网相比，更强调控制及自动化作用^[21-24]。CPS对通信技术的“感知”设备的灵敏度和可靠性要求较高，相应的计算部分和控制部分对数据处理能力的要求也较高^[25-27]。在医疗领域，CPS不仅要求监测设备具有灵敏度和可靠性，还要求设备具有实时性和时效性，以保证远程医疗的及时有效^[21,28]。相比而言，在农业上，CPS实时性要求相对较低，重点在节能和资源的合理利用，以及保证食品安全的能力。在国防领域，还应重点研究CPS的安全性和防御性^[31]。

CPS在不同研究领域面临的问题不同，在技术上的侧重点也不同，致使解决问题的方法也不同。设计时需要充分考虑所研究课题的主要问题和重点问题。根据这些问题，在达到系统要求的前提下，对3C技术要求进行相应的调整。本书基于CPS理论研究UTCRGS融合问题，也需具体问题具体分析。

针对交通领域，新一代交通系统的发展趋势是基于CPS的智能交通系统。充分运用CPS理论和设计方法，充分发挥计算技术和通信技术的优势，能够提高目前交通系统的通行能力，减少交通拥堵，降低燃料消耗，使交通系统更安全可靠^[31]。同时，CPS交通系统的人机特点，要求其要考虑驾驶员对调度影响的启发式算法^[32]。该算法建立驾驶员对调度的响应模型，将响应模型作为启发式算法的约束条件，调整所得的解使其既满足系统要求，又满足驾驶员偏好^[32]。

在结构上，以智能交通系统为例，构建了包含物理层、网络层和应用层的CPS三层体系结构框架^[33]。其中，物理层是指CPS中与物理环境紧密结合的感知设备、执行设备等；网络层是指跨区域的网络，是实现超大区域中CPS结点互联、互操作的网络；应用层将网络层和物理层的信息提供给用户，同时收集任

务需求,再将任务分配给网络层和物理层^[33]。CPS 三层体系结构框架是针对结构的划分,缺点是不利于技术上的实现。在技术上,CPS 用于交通系统中对交通环境的监测,通过数据处理得出有效交通信息,根据车辆行驶情况和有效交通信息,对车辆进行控制,以提高交通安全性^[34]。同时,在交通系统中,根据交通历史数据和数据挖掘技术,提出对 CPS 信息数据进行处理的方法,以保证信息数据准确、有效和全面^[35]。

综上所述,CPS 理论在智能交通系统领域的研究仍处于起步阶段,尚有许多问题有待研究。目前的研究,或偏重于智能交通系统整体的理论、框架和模式等“大问题”,或偏重于诱导算法、车辆控制和信息数据处理等“小问题”。UTFGS 和 UTCS 是智能交通的核心内容,本书采用 CPS 理论研究 UTFGS 和 UTCS 的融合问题,即研究基于 CPS 理论的 UTCRGS 融合框架和模式问题,在 UTCRGS 融合框架的基础上又研究了 UTFGS、UTCS 问题。

1.1.3 UTCRGS 协同的研究现状

UTFGS 和 UTCS 是智能交通的核心内容^[1],传统的方法是分别建立 UTFGS 和 UTCS,再将两者进行协同,但该方法难以达到系统优化要求。UTFGS 的目标是根据用户需求为用户提供最优诱导,以缩短用户出行时间和距离,节约出行费用。UTCS 的目标是通过修正城市交叉口信号配时来重新分配交通流,以提高交通网整体通行能力,缩短总体延误时间,达到交通系统优化要求。

两者目标的冲突是 UTFGS 和 UTCS 协同会导致拥堵问题。针对这一问题,国内外学者对 UTCRGS 进行协同研究,提出了两者的一体化协同^[36-39]和主从式协同^[1,40-42]等理论、方法及关键技术。这些协同方法中,交通诱导算法与交通控制算法不相

同，两者不同步，容易产生时间和空间上误差。误差需要借助两者协同的方法来消除。有效的消除方法与准确的交通流预测一样，通常需要较大计算量与计算时间，可能会使 UTCRGS 在时间和空间上部分失效。

UTFGS 和 UTCS 的一体化协同方法是将控制方案和诱导方案作为系统的控制分量，以控制和诱导的所有状态方程和约束作为系统的状态方程和约束，以系统最优化为目标，通过求解得出控制和诱导的最优解^[36-39]。一体化方法计算量较大，不适用于解决大范围交通 UTCRGS 问题。图 1-1 为 UTFGS 和 UTCS 的一体化协同模式。

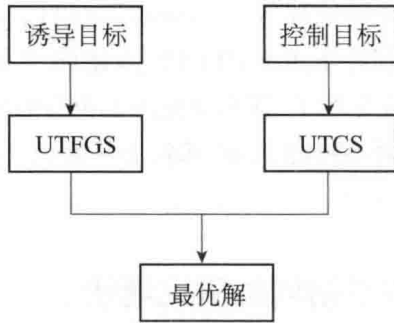


图 1-1 一体化协同模式

UTFGS 和 UTCS 的主从式协同方法是以 UTFGS 或 UTCS 为主导系统，而另一个系统作为从属系统^[1,40-42]。建立主导系统模型并作为系统状态方程，从属系统模型作为新增变量或约束条件，得出 UTCRGS 的次优解。主从式协同方法分别侧重于以诱导为主或以控制为主，UTFGS 和 UTCS 的协同程度不够，不能得出最优解。图 1-2 为 UTFGS 和 UTCS 以诱导为主的主从式协同模式。

另一种较易实施的方法是递阶协同方法^[43-45]，首先在低层次上对 UTFGS 和 UTCS 分别独立构建并求解，之后在高层次上对两者的解进行协同，将协同解及交通信息反馈至低层次，重新

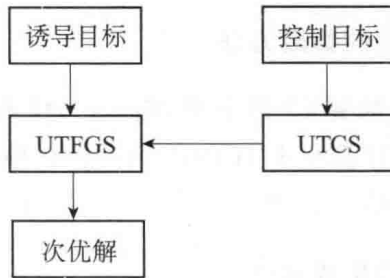


图 1-2 主从式协同模式

对低层次的 UTFGS 和 UTCS 进行求解。通过重复这种交互式协同反复求解，直至达到系统要求为止。递阶协同方法的缺点是求解步骤过多，求解时间长，且只能得到次优解。图 1-3 为 UTFGS 和 UTCS 的递阶协同模式。

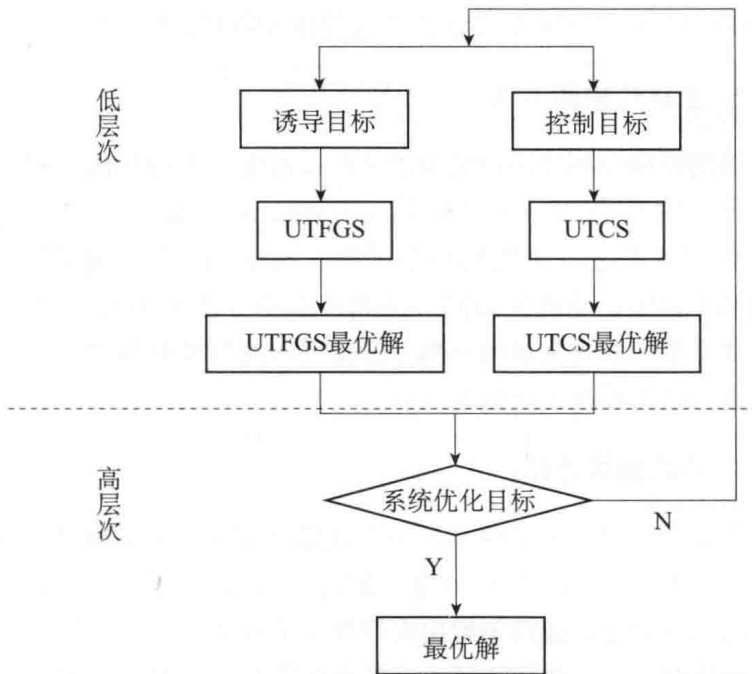


图 1-3 递阶协同模式

目前，UTCRGS 的代表性协同方法有以下四种。